

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19
по диссертации Шимановского Владимира Александровича
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел» по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 19 апреля 2024 года (протокол заседания № 2) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета № 35-О от 06.04.2022 г. в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре высшей математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Иванов Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

1. Телегин Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика» Филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Миассе.
2. Лукин Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы механики и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский

политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация – ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», г. Саратов. Отзыв ведущей организации утверждён директором, доктором физико-математических наук, Хлебцовым Борисом Николаевичем, рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории Анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике Института проблем точной механики и управления ФИЦ СЦ РАН, составлен ведущим научным сотрудником, кандидатом технических наук Голиковым Алексеем Викторовичем.

По теме диссертации соискателем опубликовано 38 научных работ, в том числе: 5 статей – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени; 1 публикация – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (Scopus, Web of Science); 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. Классификация моделей систем твёрдых тел, используемых в численных расчётах динамического поведения машиностроительных конструкций / Иванов В. Н., Домбровский И. В., **Шимановский В. А.**, Набоков Ф. В. и Шевелёв Н. А. // Вестник Удмуртского университета. Серия Математика. Механика. Компьютерные науки. — 2012. — № 2. — С. 139–155. **ВАК** (вклад соискателя 6 с./17 с.).

В работе представлена классификация форм уравнений динамики систем связанных твёрдых тел со структурой дерева, предназначенных для расчёта динамики сложных машиностроительных конструкций. В основу классификации положены компактные матричные формы записи уравнений кинематики и динамики систем тел, полученные с использованием понятия матрицы кинематической структуры и геометрического подхода при описании относительного движения. Соискателю принадлежит описание уравнений кинематики и динамики систем твёрдых тел в различных компактных матричных формах записи, разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

2. Иванов В. Н., Полосков И. Е., **Шимановский В. А.** Математические модели систем связанных твёрдых тел в импульсах Пуассона // *Фундаментальные исследования*. — 2016. — № 10-3. — С. 493–499. **ВАК** (вклад соискателя 4 с./7 с.).

В статье представлена новая матричная форма уравнений движения систем абсолютно твёрдых тел со структурой дерева в гамильтоновых переменных. В качестве независимых параметров, однозначно определяющих положение и распределение скоростей тел системы в

пространстве, выбраны обобщённые координаты и переменные, имеющие размерность импульсов. Предложен метод разрешения уравнений движения относительно старших производных, ориентированный на использование ЭВМ. Соискателю принадлежит вывод новой формы уравнений движения систем твёрдых тел, описание алгоритма разрешения уравнений движения с использованием несимметричного гауссова разложения матрицы системы, демонстрация всех этапов подготовки первичной информации и составления уравнений движения в представленной форме на примере механической системы с четырьмя степенями свободы.

3. **Шимановский В. А.** Метод компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел // *Фундаментальные исследования*. — 2017. — № 8-1. — С. 104–109. **ВАК** (вклад соискателя 9 с./9 с.).

В статье представлен вывод алгоритма разрешения уравнений движения в лагранжевых переменных систем абсолютно твёрдых тел со структурой дерева относительно ускорений, ориентированный на использование ЭВМ. Алгоритм основан на применении схемы Холецкого для решения систем дифференциально-алгебраических уравнений движения. Проведено сравнение предлагаемого алгоритма с известными алгоритмами прогонки и показано его преимущество. Выполнены численные расчёты.

4. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.** Численные методы формирования и решения уравнений движения в импульсах Пуассона систем твёрдых тел со структурой дерева // *Современные наукоёмкие технологии*. — 2017. — № 10. — С. 13–18. **ВАК** (вклад соискателя 4 с./6 с.).

В работе рассмотрены алгоритмы формирования и разрешения уравнений движения механических систем в гамильтоновых переменных, выписанных относительно расширенного состава переменных: обобщённых координат и импульсов, декартовых скоростей и импульсов. Предложены два алгоритма приведения уравнений движения к нормальной форме ОДУ. Соискателю принадлежит описание алгоритмов разрешения, создание программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

5. Ivanov V., **Shimanovskiy V.** Matrix Equations of the Motion of Multibody Systems with a Tree Structure in Hamiltonian Variables // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. — 2023. — Vol. 9, no. 4. — P. 1107–1121. **Scopus, Web of Science** (вклад соискателя 7 с./15 с.).

В статье представлен вывод новой формы уравнений движения в гамильтоновых переменных на основе обобщённого принципа Гамильтона. Показано место выведенных уравнений в общей классификации форм уравнений. Проведён сравнительный анализ вычислительной сложности различных методов компьютерного моделирования многотельных механических систем. Соискателю принадлежит вывод рекуррентных формул для определения всех кинематических и динамических переменных, входящих в уравнения, алгоритм

разрешения уравнений движения относительно старших производных без непосредственного их формирования, теоретические оценки численной эффективности различных методов моделирования. Соискателем выполнены разработка программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

6. **Шимановский В. А.**, Иванов В. Н. Анализ вычислительной эффективности матричных уравнений движения систем твёрдых тел со структурой дерева в гамильтоновых переменных // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 8(104). — С. 162-178. ВАК (вклад соискателя 12 с./17 с.).

В работе рассматривается задача моделирования динамики систем абсолютно твёрдых тел древовидной структуры. Соискателю принадлежит вывод уравнений движения с использованием понятий декартового и обобщённого импульсов, описание алгоритмов приведения уравнений движения к нормальной форме обыкновенных дифференциальных уравнений. Соискателем проведён анализ вычислительной эффективности различных алгоритмов математического моделирования динамики систем твёрдых тел. Результаты выполненного анализа представлены в виде диаграмм.

7. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.**, Домбровский И. В., Набоков Ф. В., Емшанов И. Н. Моделирование динамики механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661787 от 09.11.2015 (вклад соискателя – 20%).

Программа предназначена для моделирования динамики механической системы переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Соискателю принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

8. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.**, Домбровский И. В., Набоков Ф. В., Емшанов И. Н. Моделирование влияния упругих свойств грунта на динамику механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90grunt). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661788 от 09.11.2015 (вклад соискателя – 20%).

Программа предназначена для моделирования влияния упругих свойств грунта на динамику механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами в составе комплекса программ D90. Соискателю принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

9. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.**, Домбровский И. В., Набоков Ф. В., Емшанов И. Н. Идентификация математической модели механической системы с переменной кинематической

структурой со следящими гидроприводами (D90ident). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661789 от 09.11.2015 (вклад соискателя – 20%).

Программа предназначена для определения параметров колебаний и упруго-демпфирующих характеристик механической системы переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Соискателю принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

10. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.**, Домбровский И. В., Набоков Ф. В., Емшанов И. Н. Моделирование системы стабилизации колебаний механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами с предварительной компенсацией возмущений (D90komp). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661790 от 09.11.2015 (вклад соискателя – 20%).

Программа предназначена для моделирования системы стабилизации колебаний механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами с предварительной компенсацией возмущений. Соискателю принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

11. Иванов В. Н., **Шимановский В. А.**, Домбровский И. В., Набоков Ф. В., Емшанов И. Н. Построение оптимального управления динамическим поведением механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90opt). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661791 от 09.11.2015 (вклад соискателя – 20%).

Программа предназначена для выбора порядка и темпа функционирования механической системой переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Соискателю принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработан метод моделирования** динамики систем твёрдых тел, основанный на новой форме уравнений движения, содержащих расширенный состав переменных состояния и имеющих рекуррентную структуру;
- **предложен новый подход** к классификации уравнений движения систем твёрдых тел со структурой дерева на основе матрицы кинематической структуры;
- **разработан новый** итерационный метод разрешения уравнений движения систем твёрдых тел с положительно определённой матрицей системы относительно старших производных, предназначенный для использования совместно со стандартными

методами интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, **проведено** его теоретическое **обоснование**, доказаны теоремы о сходимости и устойчивости метода;

– **разработан новый алгоритм** приведения расширенных форм уравнений движения систем твёрдых тел со структурой дерева к системам обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме;

– **проведены** анализ и сравнение вычислительной трудоёмкости различных подходов к моделированию систем твёрдых тел, указаны условия, при которых тот или иной метод оказывается наиболее эффективным;

– **разработана библиотека подпрограмм** для описания механической системы, построения уравнений движения в различных формах и генерации программ численного моделирования;

– **разработан комплекс программ**, предназначенный для моделирования динамики, оптимизации управления и идентификации параметров одного класса технических систем с отделяющимися элементами;

– **решены прикладные задачи**, результаты которых демонстрируют адекватность разработанного аппарата моделирования.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке комплекса алгоритмов, повышающих эффективность компьютерного моделирования, в обоснованных рекомендациях по выбору наиболее эффективного подхода к формированию математических моделей сложных механических систем в зависимости от их кинематической структуры.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанных методов, алгоритмов и программного комплекса для решения задач моделирования при проектировании новых технических систем, расчётная схема которых может быть представлена в виде систем связанных абсолютно твёрдых тел.

Созданные инструментальные средства позволяют формировать в различных формах уравнений движения систем твёрдых тел и генерировать программы их численного моделирования. Предложенные математические модели и численные алгоритмы реализованы в виде комплекса программ, который используется при проектировании новых изделий ЗАО «СКБ» ПАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Обоснованность результатов диссертационной работы определяется тем, что основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных

положений теоретической механики, линейной алгебры и теории численных методов. Все представленные в работе численные алгоритмы строго обоснованы доказательством теорем о сходимости.

Достоверность подтверждается удовлетворительным соответствием теоретических результатов и сравнительных вычислительных экспериментов, а также верификацией комплекса программ по результатам стендовых и предварительных испытаний опытных изделий ЗАО «СКБ» ПАО «Мотовилихинские заводы». Для тестовых примеров результаты, полученные с использованием предлагаемых моделей, согласуются с результатами исследований других авторов.

Личный вклад соискателя: обзор литературы по теме диссертационного исследования и связанными с ней вопросами выполнен лично автором; постановка представленных в работе задач осуществлена автором совместно с научным руководителем; вывод новой формы уравнений движения систем твёрдых тел выполнен лично автором при участии научного руководителя; разработка и теоретическое обоснование алгоритмов решения поставленных задач и реализующие их программы разработаны лично автором; расчёты с использованием разработанных программных средств и анализ полученных в них результатов проведены лично автором; опубликованные статьи по теме диссертационного исследования подготовлены автором совместно с соавторами. Разработка математических моделей для исследования динамики одного класса изделий машиностроения с переменной кинематической структурой выполнена автором совместно с группой соавторов. Лично автором выполнены описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения учёных степеней в ПНИПУ, утверждённым приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-О: в диссертации разработаны эффективные алгоритмы построения метаматематических моделей систем твёрдых тел, ориентированные на численные исследования и ускоряющие вычислительные процессы компьютерного моделирования, что имеет важное значение для внедрения в инженерную практику новых инструментальных средств моделирования динамики сложных технических систем и в создании независимого российского программного обеспечения.

На заседании 25 июня 2024 года диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Шимановскому Владимиру Александровичу учёную степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 3).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 15 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение учёной степени – 13, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,
д-р физ.-мат. наук, проф.



Трусов Петр Валентинович

Учёный секретарь
диссертационного совета Д
канд. физ.-мат. наук



Кротова Елена Львовна

